

木質部材のボルト接合における締結力の発現とその緩和挙動

藤元, 嘉安
九州大学農学部木材工学講座

西嶋, 俊人
三井ホーム

又木, 義博
九州大学農学部木材工学講座

<https://doi.org/10.15017/23531>

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 49 (1/2), pp.53-60, 1994-11. 九州大学農学部
バージョン：
権利関係：

木質部材のボルト接合における締結力の発現とその緩和挙動

藤元 嘉安・西嶋 俊人*・又木 義博

九州大学農学部木材工学講座

(1994年8月2日受理)

Behaviors of Production and Relaxation of Fastening Force in Bolted Joint for Wood Construction

Yoshiyasu FUJIMOTO, Toshihito NISHIJIMA* and Yoshihiro MATAKI

Laboratory of Wood Technology, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812

緒 言

近年、木質構造体において、木質部材同士あるいは木質部材と基礎との接合固定にボルトが多用されており、その様式・構成も多種多様となっている。これまで、木質部材のボルト接合に関する研究は数多くなされてきているものの、ボルト締結時における締付け条件等については明確な規定があまりなされていない。本来、木材は外力に対して緩和挙動を示すため、ボルトの軸力が低下し、部材同士の緊結力が低下するものと思われる。実際、施工関係者らの経験から、ボルト締結後のボルトの緩みの問題が指摘され、また、工事が進展した後では、ボルトが枠材および壁材等の他の構造部材に覆われ、ボルトの増締めができないなどの状況も知られている。

ボルト軸力による部材間の緊結の状態と、外力による接合部の強度特性に関する研究としては、平井(1991)が鋼板をサイドウェブとする木材のボルト接合部において、ボルト接合部の最大耐力はボルト軸力に比例した摩擦抵抗により増加することを報告している。ボルト接合部において、ボルト軸力は接合部の強度特性に大きな影響をおよぼすことから、ボルト軸力の緩和現象により、安定的な接合固定が損なわれる挙動が生じ、接合部の強度性能、すなわち、構造体全体の強度性能が低下するものと思われる。

また、ボルトによる締結力は、木質部材の接着操作

において被着材同士の圧縮にも利用されており、その応力分布等に関する研究が楊ら(1991)によりなされている。このような場合にも、安定的な圧縮圧力を得るためには、締結後のボルト軸力による圧縮力やその分布の緩和挙動を把握することが重要であると考えられる。

そこで、本研究では、実際の使用条件下におけるボルトの軸力の緩和挙動を明らかにするために、ボルト結合におけるボルト軸力および木質部材内のひずみ分布の発現およびその経時的変化について、締付け時のボルト軸力の大きさがおよぼす影響について検討を行った。

材料と方法

1. ボルトの締付けトルクおよび軸力の測定

供試材としては、北米産のスプリュースの二方椋、10cm角の柱材を用いた。その基本的な性質を Table 1 に示す。

ボルト・ナットおよび座金については、木造住宅に標準的に用いられているものの中から、いずれも公称

Table 1. Specimen used in this experiment.

Species	Specific gravity	Moisture content (%)	Average of annual ring width (mm)
Spruce	0.40 (0.01)	16.6 (0.3)	1.51 (0.10)

() : Standard deviation.

* 三井ホーム

られた。これは、本実験ではトルクレンチに一定荷重を与え、トルクレンチが水平の状態がとれた時点でボルト軸力の測定を行ったため、平衡がとれるまでのナットの回転量、およびナットを回転させた直後のボルト軸力の急激な初期緩和等の差異により、測定値にかなりの差が見受けられたものと思われる。

全体的傾向としては、鉄材は締付けトルクの増加に伴いボルト軸力はほぼ直線的に増加するのに対し、スプルース材の場合には、締付けトルクがおおよそ500kgf・cm以上（あるいは、ボルト軸力が700kgf以上）では、ボルト軸力が増加しにくくなる傾向を示し

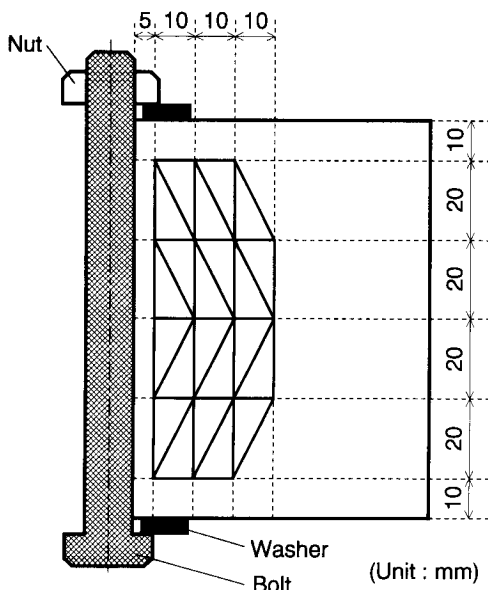


Fig. 2. Elements of contour map for compressive strain.

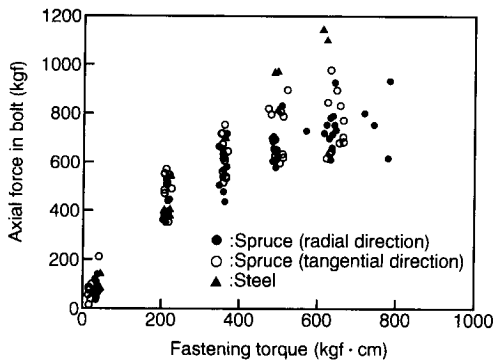


Fig. 3. Relationships between fastening torque and axial force in bolt.

た。また、詳しい測定は行っていないが、ボルト軸力が400kgf以上になると、座金の木材への食い込みが見られ、軸力1000kgfではその量が著しくなることが確認された。スプルース材の場合、締付けに伴い、軸力がある一定値になると木材の座金付近の部分的な塑性変形あるいは圧縮破壊が進行することにより、締付けトルクの増加に対し軸力が増加しにくくなったものと考えられる。このことから、ボルトにより木材を接合する場合には、適切な締付けトルクが存在するものと思われる。しかしながら、この適正值はボルト、座金および部材の寸法、強度特性等により決定されるため、さらに検討が必要である。

締付け方向が木材の放射方向と接線方向とでは、そのヤング率の違いにより、放射方向の方が生じる軸力は大きくなるものと推測されるが、締付け直後の瞬間的な軸力の減少が著しいことなどによるばらつきが大きいため、締付け方向の違いによる軸力の差は確認できなかった。

2. ボルト締め付け過程における部材内のひずみ分布

締付け過程におけるひずみ分布の一例を Fig. 4 に示す。これは、締付けによるボルトの軸力を1000kgfと設定した場合について、ひずみの分布を等高線で示したものである。軸力の小さい場合には、座金近辺でのひずみの発生がみられる他は、ひずみの分布は明瞭ではないが、軸力が増加するに伴い座金近辺でのひずみが増加するとともに、木材中央部のひずみが、締付け両端座金を頂点とするような円錐形あるいは紡錘形状に分布し、増加して行くものと考えられる。このひずみ分布の形態については、座金の寸法、木材の厚さならびに木材の異方性などを考えると一概にこのような形態をとるとは言い難く、これらの因子による差異については今後検討を要するものと思われる。また、座金近辺におけるひずみは、ボルト頭部側あるいはナット側のいずれかが非常に大きくなり、木材中のひずみの分布に偏りを示すものも認められた。このひずみ分布の偏りには規則性は認められず、その原因については不明である。

締付け過程における軸力と木材の厚さ方向（圧縮方向）中央部のボルト穴近傍（Fig. 1中、点A）の圧縮ひずみとの関係を Fig. 5 に示す。締付けによりボルト軸力が増加するが、これに伴い圧縮ひずみもほぼ直線的に増加する傾向を示した。これに対し、座金近傍（Fig. 1中、点B）における圧縮ひずみは点Aでのひずみのほぼ2倍近くの値を示し、また、試験体により

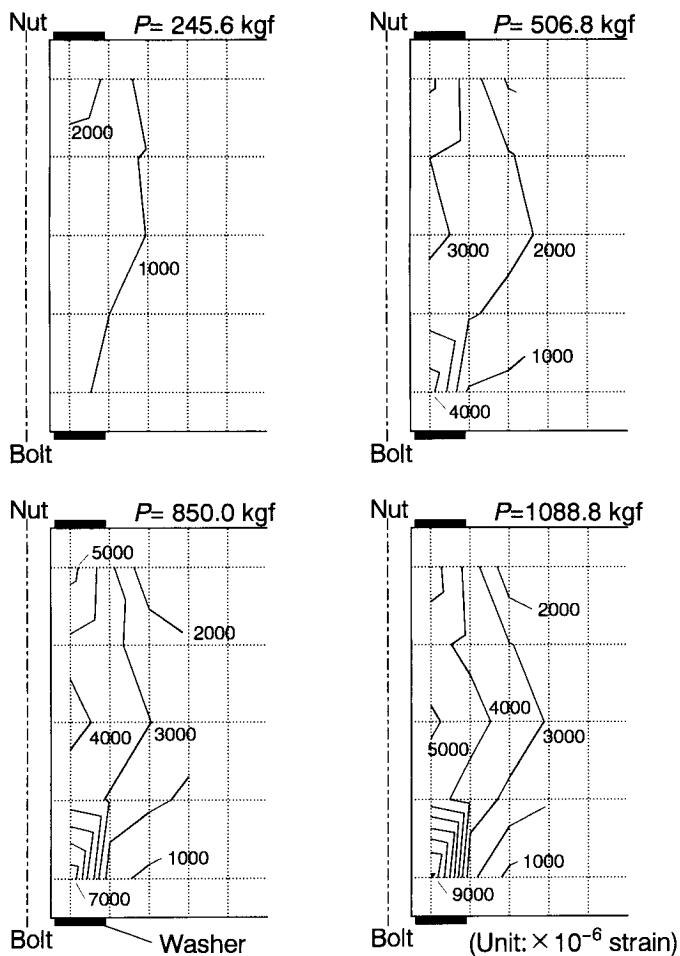


Fig. 4. Contour map of compressive strain along the thickness direction in fastened state.
 P : Axial force in bolt.

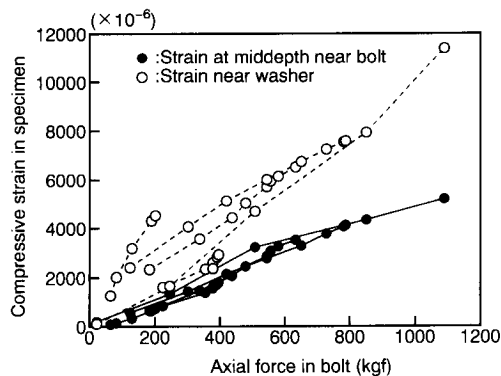


Fig. 5. Relationships between axial force in bolt and compressive strain in specimen.

かなりの差が認められた。

3. 緩和過程におけるボルト軸力の変化

緩和過程におけるボルト軸力の変化の一例を Fig. 6 に示す。これは、初期軸力が 800kgf と 200kgf の場合の測定期間中における軸力と周囲の湿度の変化を示している。ボルト軸力の変化は、いずれの初期軸力においても、短期的には、締付け直後数分間に大きく軸力が減少し、その後、1000分ぐらいまでの間に軸力がほぼ半減するような緩和挙動を示した。この期間では、周囲の湿度変化の影響はさほど認められず、きれいな曲線を描いた。その後は緩和の程度が小さく、長期的には、ボルト軸力は周囲の湿度変化による木材の膨潤収縮に大きく左右されながら緩和傾向が乱された。す

なわち、周囲の湿度が上昇すると、木材が膨潤するため軸力が増加し、湿度が下降すると、木材が収縮し軸力が減少する傾向が認められた。この傾向は、締付け時のボルト軸力が小さいものほど顕著に現れ、とくに軸力 200kgf で締付けた場合は、同図のように周囲の湿度の上昇に伴い軸力が増加し、締付け時の軸力よりも大きくなるようなケースも認められた。このことは、締付け時の軸力が小さい場合、座金付近の圧縮による部分的な塑性変形あるいは圧縮破壊が少なく、湿度変化に敏感な健全な部分が多く残っており、周囲の湿度の上昇に伴う木材の膨潤圧の発現の影響を大きく受けているものと考えられる。

一般的に木材のクリープおよび応力緩和挙動に関して $\log t$ 則と t^n 則が適合するとされている(渡辺, 1978)。ここでは、1 個の係数により緩和の様子が表現できる $\log t$ 則を用いて検討を行った。すなわち、各設定軸力におけるボルト軸力の経時変化を次式により回帰分析を行った。なお、周囲の湿度変化による軸力の大きな変動を示すデータについてはこれを除外して回帰した。

$$\frac{P_t}{P_1} = 1 - m_P \cdot \log t \quad (1)$$

ここで、 P_1 , P_t はそれぞれ締付け 1 分後および t 分後のボルト軸力である。また、 m_P は緩和係数であり、大きくなるほど緩和が大きいことを示す。

結果を Table 2 に示す。初期軸力が 200kgf の場合を除いて、初期軸力が大きいものほど緩和係数 m_P は大きくなり、緩和の割合が大きくなる傾向を示した。とくに、初期荷重 1000kgf では m_P の値の増加が大きくなり、緩和が著しいことが示される。したがって、前述の締付けトルクと発現するボルト軸力との関係とをあわせて考慮すると、本研究でのボルト締結条件では、初期のボルト軸力を 600~800kgf となるように設定するのが最も効果的であるといえる。また、締付け後 1 分における軸力の緩和の割合 (P_1/P_0) は、初期軸力の大きさに関わらずほぼ一定の値を示し、締付け後の 1 分間において締付け時の 15~20% 程度が緩和していることが示される。

4. 緩和過程における部材内のひずみ分布

緩和過程におけるひずみ分布の経時変化の一例として、締付けの軸力を 1000kgf とした場合のものを Fig. 7 に示す。各部位でのひずみは、締付け後、時間経過に伴い減少しながら変化した。木材中央部のボルト穴に近い部分での圧縮ひずみ 4000 μ ストレインの範囲が

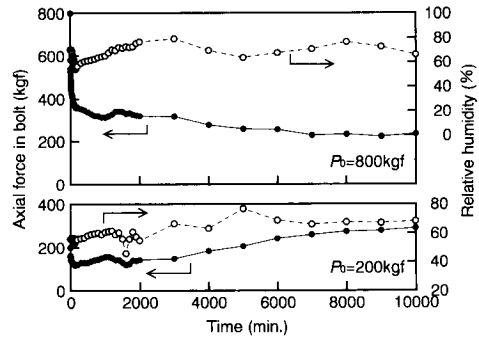


Fig. 6. Variation of axial force in bolt with change of relative humidity after fastening.

P_0 : Initial value of axial force in bolt.

Table 2. Coefficients in equation $P_t/P_1 = 1 - m_P \cdot \log t$.

P_0	P_1	P_1/P_0	m_P	r^2
200.4	172.2	0.855	0.1238	0.941
398.6	332.1	0.833	0.1117	0.844
608.8	496.9	0.816	0.1129	0.876
783.5	661.0	0.844	0.1207	0.916
1072.0	892.5	0.833	0.1677	0.933

P_0 : Axial force in bolt (kgf) just after fastening.

P_1 : Axial force in bolt (kgf) at 1 minute after fastening.

m_P : Relaxation coefficient of axial force in bolt.

t : Time (min.).

r : Correlation coefficient.

時間経過に伴い大きく減少するのに対し、2000 μ ストレインの範囲はさほど減少せず、ボルト近辺での圧縮ひずみの減少が大きく、また、ボルトから遠くにある部分ほど緩和量が小さく、時間が経つにつれて圧縮ひずみの分布が平坦になる傾向を示した。また、ボルトから遠くにある部分では、湿度の影響を受けひずみの分布が乱れるような傾向が認められた。ボルトによる締付けを行わない状態での、通常の湿度変化における各部位でのひずみの変化は、おおよそ 200~300 μ ストレインであったことから考えると、軸力が小さく発生ひずみの小さい場合に比べ、ひずみの大きな場合には相対的に湿度の影響は小さくなっているものと思われる。

各設定軸力について、木材中央部のボルト近傍における圧縮ひずみの経時変化を Fig. 8 に示す。ひずみは締付け直後から 500 分程度の間やや大きな減少を示

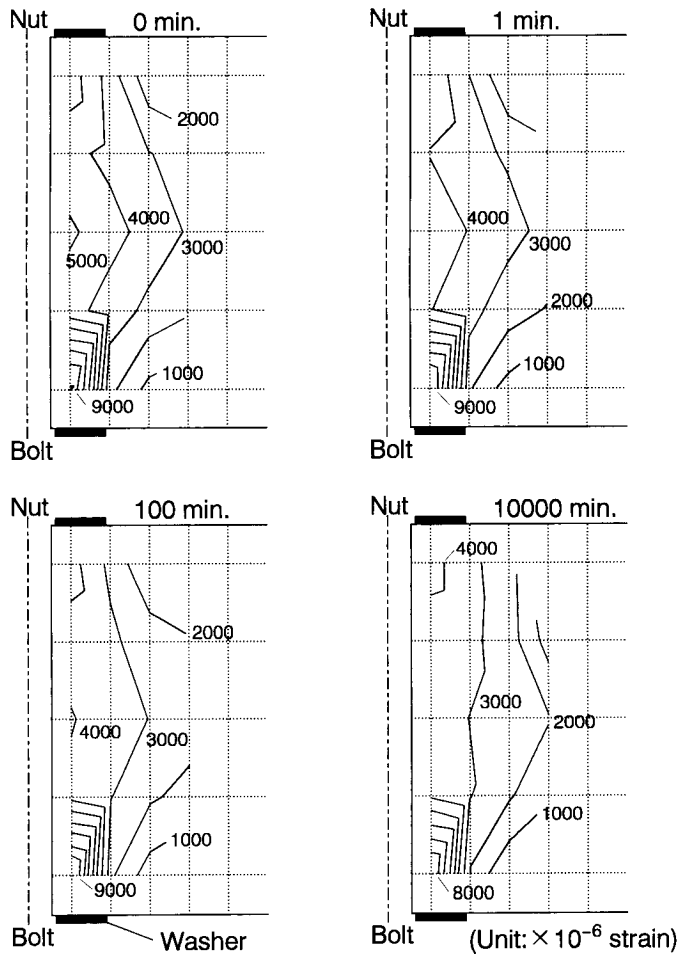


Fig. 7. Contour map of compressive strain along the thickness direction (after fastening).

し、その後は緩和の程度が緩やかなものとなった。

各設定軸力について点Aにおける圧縮ひずみの緩和曲線を、ボルト軸力の場合と同様に、次式で回帰した場合のそれぞれの係数を Table 3 に示す。

$$\frac{S_t}{S_1} = 1 - m_s \cdot \log t \quad (2)$$

ここで、 S_1 、 S_t はそれぞれ締付け 1 分後および t 分後の木材中央部のボルト近傍における圧縮ひずみである。

初期軸力が 200kgf の場合を除いて、締付け後 1 分間におけるひずみの締付け時のひずみに対する比は、初期軸力の大きなものほど大きくなった。緩和係数 m_s も同様に初期軸力が大きくなるに伴い大きくなるが、初期軸力 1000kgf では減少した。

Table 3. Coefficients in equation $S_t/S_1 = -m_s \cdot \log t$.

P_0	S_0	S_1	S_1/S_0	m_s	r^2
200.4	742	681	0.918	0.0257	0.932
398.6	1801	1770	0.983	0.0199	0.716
608.8	3531	3421	0.969	0.0275	0.925
783.5	4408	4085	0.927	0.0368	0.962
1072.0	3111	2737	0.875	0.0331	0.843

S_0 : Compressive strain just after fastening.

S_1 : Compressive strain at 1 minute after fastening.

m_s : Relaxation coefficient of compressive strain.

t : Time (min.).

r : Correlation coefficient.

いずれの軸力の場合においても、締付け時の発生ひずみの 80~90% ほどは緩和せずに残っているものと考え

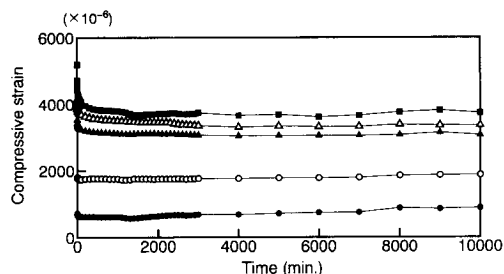


Fig. 8. Relaxation behavior of compressive strain at the point 5mm away from circumference of hole located at the center of wood under various axial forces in bolt.
 ● : Initial force=200kgf ; ○ : 400kgf ;
 ▲ : 600kgf ; △ : 800kgf ; ■ : 1000kgf.

えられる。軸力の緩和量が初期軸力の50%以上緩和するのに比べ、木材中のひずみの緩和量は非常に少なく、軸力がかなり減少しても木材内のひずみあるいは緊結力は残存していることから、ボルト締結された木材の座金近傍の圧縮破壊の進行により、ボルト軸力は緩和されるものの、木材中央部の緊結力は保持されているものと考えられる。

要 約

木質部材のボルト接合部に関し、ボルト締結時におけるボルト軸力および木質部材内のひずみの発現、およびそれらの緩和について実験的にその挙動を明らかにした。

(1) ボルト締結時において、ボルトの締付けに伴いボルト軸力および締付けトルクは増大するが、木質部材では軸力の瞬間的な緩和が大きく、ある一定トルク以上では、軸力の増加の割合が減少した。

(2) ボルト締結時における部材内のひずみは、座金

近傍でのひずみの増大が先行し、その後、軸力の増加に伴い締付け両端座金を頂点とするような円錐形ないしは紡錘形状に分布し増加する傾向を示した。

(3) ボルト軸力は、締付け直後数分間に大きく減少し、その後、約1000分までの間は周囲の湿度変化の影響が現れず、ほぼ50%程度が緩和した。それ以降は、周囲の湿度変化を受け緩和傾向が乱された。また、初期軸力のボルト軸力が大きなものほど緩和の程度が大きく、とくに初期軸力1000kgfの場合には著しい緩和を示した。本研究における実験条件の範囲内では、初期ボルト軸力を600~800kgfに設定するのが最も効果的であると言える。

(4) ボルト締結後の部材内のひずみ分布は、ボルトに近い部分での緩和が大きく、ボルトから遠くの位置でのひずみの緩和は小さかった。周囲湿度の変化による影響は、ひずみの大きいところではそれほど大きくなく、ひずみの小さいところほど影響を受け易かった。

(5) ボルト軸力が大きく緩和するのに対し、部材内のひずみはさほど緩和しないことから、ボルト軸力の緩和には、座金近傍の大きなひずみを生じているところの挙動が大きく左右しているものと考えられる。

文 献

- 平井卓郎 1991 鋼板サイドウェブを持つ木材 ボルト接合部のせん断耐力に及ぼす摩擦抵抗の影響, 木材学会誌, 37(6): 517-522
 渡辺治人 1978 木材理学総論, 農林出版, 東京, 497-499頁
 楊 萍・秦 正徳・佐々木光・小西 信・駕海四郎 1991 接着面の圧縮圧力分布と接着性(第1報) ボルトクランプ圧縮接着における圧縮圧力分布と接着性, 木材学会誌, 37(7): 611-618

Summary

The behaviors of production and relaxation of fastening force in bolted joint for wood construction were experimentally investigated.

In the fastening stage, the axial force in bolt and the fastening torque become larger with increasingly fastening the bolt until fastening torque reached at some level. However, the axial force in bolt was hard to increase when fastening the bolt at higher level than that, because of immediate relaxation of axial force in wood members. And in this stage, the compressive strain in wood member was increased at the portion near the washer first, and then it was distributed in the shape of a coniform or a fusiform having the tops in both washer sides.

The relaxation of axial force in bolt was extremely large in a few minutes after fastening, and

the axial force was reduced to about half until 1000 minutes after fastening. Then, the change of axial force in bolt was subjected to the change of relative humidity of circumstance. The relaxation of axial force in bolt developed extremely in the case of initial axial force of above 600 to 800kgf. Although the axial force in bolt was reduced over 50 percent of initial force, more than 80 percent of compressive strain in wood member was remained even after 1000 minutes after fastening.